

新疆旱地冬小麦生育期的气候变化及其对生产潜力的影响

房彦飞¹,张山清²,唐江华¹,徐文修¹,罗晓颖¹,胡冬平¹

(1. 新疆农业大学农学院,新疆乌鲁木齐 830000; 2. 新疆维吾尔自治区农业气象台/新疆兴农网信息中心,新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:为了解新疆旱地冬小麦生育期的气候变化及其对生产潜力的影响,利用1961—2020年11个气象站点逐月气象资料,选择农业生态区域法(AEZ)模型计算新疆旱地冬小麦生产潜力,运用线性倾向估计法、Mann-Kendall趋势检验(M-K)、反距离权重插值等分析了新疆冬小麦生产潜力的时空变化趋势及其影响因素。结果表明,1961—2020年新疆旱地冬小麦生育期平均温度、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和降水量随时间的推进均呈升高的趋势,倾向率分别达到 $0.41^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $74.05^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 和 $9.82\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$;日照时数呈下降趋势,倾向率达到 $-23.32\text{h}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。在空间上,旱地冬小麦生育期平均温度和降水量整体均以伊犁河谷地区最高, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和日照时数整体分别以塔额盆地和昌吉州东部最高。各站点平均气温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温呈极显著($P<0.01$)增加趋势,以塔额盆地平均增速最快;昌吉州东部降水量平均增速最快;昌吉州东部平均日照时数下降速率最快。冬小麦光温生产潜力和气候生产潜力呈增加趋势,其倾向率分别达到 74.54 和 $323.79\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。空间上光温生产潜力和气候生产潜力整体上分别以塔额盆地和伊犁河谷地区最高。其中,塔额盆地光温生产潜力和昌吉州东部气候生产潜力的增速均最快,二者的平均速率分别为 101.45 和 $487.50\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。光温生产潜力与气温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温呈显著正相关,与降水量呈显著负相关;气候生产潜力与降水量呈显著正相关,与日照时数呈显著负相关。80%左右的研究站点同上述相关性一致;在降水量丰富的伊犁河谷地区,气温和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是影响冬小麦生产潜力主要因素。因此,新疆旱作农区暖湿化气候有利于旱地冬小麦生产潜力的提高,且在此气候背景下未来新疆气候资源变化对旱地冬小麦的增产有利。

关键词:新疆;旱地冬小麦;气候变化;生产潜力

中图分类号:S162.53;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)05-0697-12

Climate Change during Growing Season of Winter Wheat and Its Impact on Production Potential in Xinjiang Dryland

FANG Yanfei¹, ZHANG Shanqing², TANG Jianghua¹, XU Wenxiu¹, LUO Xiaoying¹, HU Dongping¹

(1. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Agro-meteorological Observatory/Information Centre of Xinjiang Xingnong-Net, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: To understand the climate change during the growth period of winter wheat in dryland areas of Xinjiang and its response to production potential, monthly meteorological data from 11 weather stations from 1961 to 2020 were utilized. The Agro-Ecological Zone(AEZ) model was selected to calculate the production potential of winter wheat in the dryland areas of Xinjiang. Linear propensity estimation, Mann-Kendall trend test(M-K), and inverse-distance weighting interpolation were employed to analyze the spatiotemporal trends and influencing factors of winter wheat production potential in Xinjiang. The results indicated that from 1961 to 2020, the average temperature, accumulated temperature($\geq 10^{\circ}\text{C}$), and precipitation during the growth period of winter wheat in the dryland areas of

收稿日期:2024-05-17

修回日期:2024-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(32060448);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2022G133)

第一作者 E-mail:13009634490@163.com(房彦飞)

通讯作者 E-mail:xjxwx@sina.com(徐文修)

Xinjiang showed an increasing trend, with changing rates of $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{per decade}$, $74.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{per decade}$, and $9.82\text{ mm}\cdot\text{per decade}$, respectively. Sunshine duration showed a decreasing trend, with a decrease rate of $23.32\text{ h}\cdot\text{per decade}$. Spatially, the Ili River Valley region had the highest average temperature and precipitation during the growth period of winter wheat, while the Tacheng-Emin Basin and the eastern part of Changji Prefecture had the highest accumulated temperature ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) and sunshine duration, respectively. The average temperature and accumulated temperature ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) at each station showed a highly significant ($P < 0.01$) increasing trend, with the Tacheng-Emin Basin having the fastest average growth rate. The eastern part of Changji Prefecture had the fastest average growth rate in precipitation and the fastest decline rate in sunshine duration. The light-temperature production potential and climate production potential of winter wheat showed an increasing trend, with trend rates of 74.54 and $323.79\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{per decade}$, respectively. Spatially, the Tacheng-Emin Basin and the Ili River Valley region had the highest light-temperature production potential and climate production potential, respectively. Among them, the Tacheng-Emin Basin had the fastest growth rate in light-temperature production potential, and the eastern part of Changji Prefecture had the fastest growth rate in climate production potential, with average rates of 101.45 and $487.50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{per decade}$, respectively. The light-temperature production potential was significantly positively correlated with temperature and accumulated temperature ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), but significantly negatively correlated with precipitation. The climate production potential was significantly positively correlated with precipitation, but significantly negatively correlated with sunshine duration. About 80% of the research stations showed consistent correlations with the above. In the Ili River Valley region with abundant precipitation, temperature and accumulated temperature ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) were the main factors affecting winter wheat production potential. Therefore, the warming and humidifying climate in the dryland agricultural areas of Xinjiang is conducive to improving the production potential of winter wheat, and under this climate background, future changes in climate resources in Xinjiang will be beneficial for increasing the yield of winter wheat in dryland areas.

Keywords: Xinjiang; Winter wheat in dryland; Climate change; Production potential

农业对气候的变化非常敏感,是受气候影响最严重的产业之一^[1]。据 IPCC 第六次评估报告指出,自 2012 年以来,全球地表温度急剧升高,2011—2020 年全球地表温度较 1850—1900 年升高了 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,并估测全球温升将在 2021—2040 年突破 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,且降水受全球气候变暖影响加剧,并已显现出区域性差异特征^[2-4]。全球气候升温导致农业气候资源在数量和质量上的变化,直接影响农业生产潜力、农业产品生产和种植制度,威胁全球粮食安全生产^[5-8]。

受气候变化影响,全球玉米和小麦的生产潜力分别减少了 3.8% 和 5.5% ^[9-10]。气候变化降低了欧洲东部地中海沿岸及亚洲印度河盆地粮食作物生产潜力^[11-13],但增加了亚洲新月沃土地区小麦的生产潜力^[12]。气候对中国农业生产影响巨大,1980—2019 年中国粮食主产区水稻和小麦的气候生产潜力显著上升,玉米气候生产潜力显

著下降,且气候生产潜力呈现自东南向西北递减的空间结构^[14-15]。中国雨养小麦平均生产潜力减少 5% ,灌溉小麦生产潜力变化不大,1961—2010 年中国雨养和灌溉小麦单产潜力增加的区域主要为东北、华北和四川盆地,西北和东南地区单产潜力减少^[16]。受气候干旱化的影响,1981—2010 年在气候生产潜力呈下降趋势,地区玉米光温生产潜力显著增加^[17],而 1961—2015 年东北三省春玉米气候生产潜力均呈递减趋势^[18]。另外,也有学者通过对新疆棉花、玉米光温生产潜力的计算发现了新疆部分作物光温生产潜力的空间分布以及影响作物产量提高的制约因素^[19-20]。但上述研究主要集中在气候变化背景下对灌溉区不同作物生产潜力变化的特征分析,对雨养农业区作物生产潜力的研究多以降水量较大的区域为主。而针对新疆特殊的极端干旱条件且降水量相对较少的雨养农业区作物生产潜力的研究鲜有报道,且新

疆虽然属于灌溉农业区,但北疆仍分布着一些相对集中、面积较大的旱地,其生产的粮食对灌溉农业仍起着重要的补充作用^[21]。

本研究以新疆旱作农区为研究区域,探究新疆旱地冬小麦生育期主要气候资源及光温、气候生产潜力的时空变化特征,确定影响新疆旱地冬小麦生产潜力的主要气候因子,为合理利用气候资源、规避气候风险和um提高新疆旱地冬小麦高产育种和栽培措施提供理论和依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域和数据来源

本研究以冬小麦为研究对象,在新疆昌吉州

东部、伊犁河谷中上游山间平原谷地和塔额盆地边缘地区选取旱地面积较大的县、市中的 11 个气象站点 1961—2020 年逐月气象资料,包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、相对湿度、风速,所用数据由新疆维吾尔自治区气象局和中国气象局国家信息中心提供。研究区域和气象站点分布如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 气候倾向率计算

气候倾向率通常用一元线性方程来描述要素的变化趋势^[22],即 $y_i = a + bt_i (i = 1, 2, \dots, n)$,式中, t_i 为时间,指 1961—2020 年,取值为 1, 2, ..., 59; b 为回归系数, $10b$ 为气候倾向率; a 为常数。

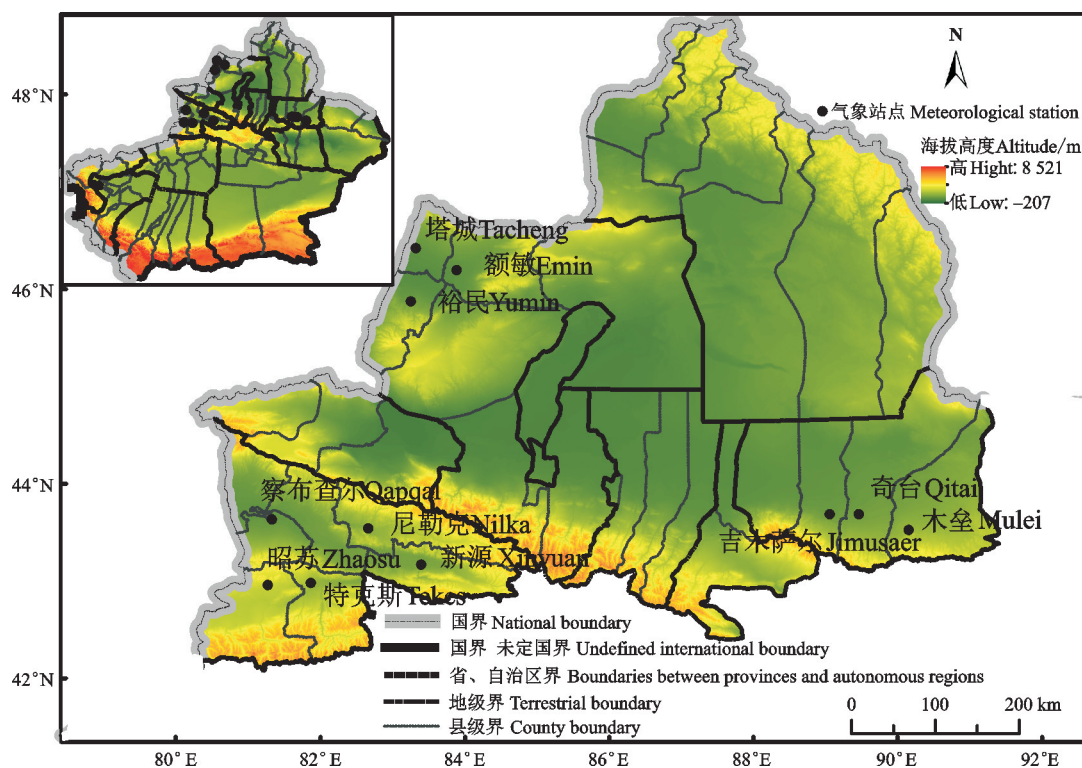


图 1 新疆主要旱作农区及气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of major rainfed farming areas and meteorological stations in Xinjiang

1.2.2 光温生产潜力计算

冬小麦光温生产潜力采用联合国粮农组织推荐的农业生态区域法(AEZ)模型计算。

①当最大干物质总生产率 $y_m \geq 20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,光温生产潜力计算公式为:

$$Y_{mp} = CL \times CN \times CH \times G \times [F \times (0.8 + 0.01y_m) \times y_0 + (1 - F) \times (0.5 + 0.025y_m) \times y_c]$$

②当最大干物质总生产率 $y_m \leq 20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,光温生产潜力计算公式为:

$$Y_{mp} = CL \times CN \times CH \times G \times [F \times (0.5 +$$

$$0.025y_m) \times y_0 + (1 - F) \times (0.05y_m) \times y_c]$$

$$F = (R_{se} - 0.5R_s) / 0.8R_{se}$$

$$R_s = 59R_a \times (a + b \times n / N)$$

式中, Y_{mp} 为小麦光温生产潜力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); CL 为叶面积指数的校正值,取值 0.5; CN 为净干物质生产量的校正值,取值 0.7; CH 为收获指数的校正值,取值 0.48; G 为作物全生育期天数(d),采用研究区域站点的当地农业气象站提供的历年冬小麦生育期的平均天数; F 为云层覆盖率(%); R_{se} 为晴天最大入射有效短波辐

射($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_s 为实测入射短波辐射($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_a 为用水的毫米数表示的碧空条件下的太阳辐射($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); a 、 b 与各地的大气透明度有关,取值分别为 0.18、0.55; n/N 为日照百分率(%); y_m 为特定气候条件下的干物质生产率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); y_0 为特定点下小麦在全阴天情况下总干物质生产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); y_c 为特定点下小麦在全晴天情况下总干物质生产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)。上述公式中, y_m 可根据计算出的全生育期平均温度并参考文献查表得出相对应的值, R_{sc} 、 R_a 、 y_0 和 y_c 值均可根据站点纬度并参考文献查表可得^[23]。

1.2.3 气候生产潜力计算

气候生产潜力(Y_p)是通过水分校正系数对光温生产潜力(Y_{mp})进行修正后获得的。

(1)冬小麦各阶段作物需水量(ET_m)

$$ET_m = K_c \times ET_0$$

式中, ET_m 为冬小麦各阶段作物需水量(mm); K_c 为作物系数,各阶段取值不同,根据 FAO-56 推荐的作物系数基础上并参考相关文献调整确定^[23-24],具体取值见表 1; ET_0 为参考作物蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$),利用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith(P-M)公式^[25]计算 ET_0 ,具体公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{mean} + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34u_2)}$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物表面的净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T_{mean} 为平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为距地面 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水气压(kPa); e_a 为实际水气压(kPa); Δ

为饱和水气压-温度曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。该方法通过研究区获得的气象数据便可计算,各变量的具体计算和推导方法参考文献^[23]。

(2)播前土壤有效水分贮存量(S_{A0})

$$S_{A0} = \sum j P_A - 0.1 \times \sum j ET_0$$

式中, S_{A0} 为播前土壤有效水分贮存量(mm); P_A 为降水量(mm); ET_0 为作物蒸腾蒸散量(mm); j 为天数。

作物各阶段实际耗水量(ET_a)的计算分两种情况,下式中 S_{A1} 为上一阶段土壤有效水分贮存量,计算式如下:

①当本生长阶段降水量 $P_A + S_{A1} > ET_m$ 时, $ET_a = ET_m$; 本阶段土壤有效水分贮存量 $S_{A2} = P_A - ET_m + S_{A1}$;

②当本生长阶段降水量 $P_A + S_{A1} < ET_m$ 时, $ET_a = P_A + S_{A1}$, 本阶段土壤有效水分贮存量 $S_{A2} = 0$ 。

(4)气候生产潜力(Y_p)

$$Y_p = Y_{mp} \times I_y$$

$$I_{yi} = 1 - K_{yi} \left(\frac{\sum ET_{ai}}{\sum ET_{mi}} \right)$$

式中, Y_p 为气候生产潜力($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); I_y 为最终阶段产量指数(%); I_{yi} 为第 i 阶段产量指数(%); ET_{ai} 为第 i 阶段实际耗水量(mm); ET_{mi} 为第 i 阶段作物需水量(mm); K_{yi} 为第 i 阶段作物反应系数,根据 FAO-56 推荐并结合研究区实际情况调整确定^[23],具体取值见表 1。

1.3 数据处理、分析和绘图

采用 Excel 2010 软件处理数据,绘制时间序列趋势图。利用 Matlab 编程进行 M-K 趋势显著性检验;统计量 Z 值为正值表示呈增加趋势,为负值表示呈减少趋势。 Z 值的绝对值大于 1.96、2.58 分别表明变化趋势通过 0.05 和 0.01 水平

表 1 旱地冬小麦各生育时期的划分与不同生育时期作物反应系数、作物系数

Table 1 Division of dryland winter wheat growth stages and crop response coefficients and crop coefficients at different growth stages

生育时期 Growth stage	K_y	K_c	起止时间(月/日) Duration(month/day)
播种期—越冬期 Sowing—overwintering	0.2	0.35	9/10—10/31
返青期—拔节期 Regreening—jointing	0.4	0.80	4/1—5/10
拔节期—开花期 Jointing—anthesis	0.55	1.0	5/11—5/31
开花期—成熟期 Anthesis—maturity	0.6	0.3	6/1—7/15

K_y : 作物反应系数; K_c : 作物系数。

K_y : Crop response coefficient; K_c : Crop coefficient.

的显著性检验^[26]。采用 Arc GIS 的反距离权重插值法,完成新疆旱作农区气象因子及冬小麦生产潜力的空间分布图。运用 SPSS 19.0 软件分析冬小麦生产潜力与各气候因子的相关性。

2 结果与分析

2.1 新疆旱地冬小麦生育期气候因子变化特征

1961—2020 年新疆旱地冬小麦生育期的平均温度随时间的推进整体呈波动上升趋势,近 60 年平均温度为 4.35 °C,气候倾向率为 0.41 °C · (10 a)⁻¹;旱地冬小麦平均温度最高和最低值分别出现在 1969 和 2020 年,分别为 1.34 和 6.38 °C(图 2a)。从空间分布特征看,新疆旱地冬小麦生育期平均温度整体上表现为伊犁河谷地区>塔额盆地>昌吉州东部,平均气温变化范围为 1.8~7.4 °C,最高值和最低值分别位于伊犁河谷地区新源和昭苏(图 3a1)。从旱地小麦生育期平均气温倾向率变化趋势的空间分布来看,各站点平均温度均呈极显著的增加趋势($P < 0.01$),其中塔额盆地位于增温速率的高值区,而昌吉州东部增

温速率最慢(图 3b1)。

随时间的推进,新疆旱地冬小麦生育期 ≥ 10 °C 积温整体上呈波动上升趋势,近 60 年平均值为 1 982.92 °C,以 74.05 °C · (10 a)⁻¹ 的速率增加;最高和最低值分别出现在 1993 和 2020 年,值分别为 2 438.06 和 1 648.42 °C(图 2b)。空间分布上整体以塔额盆地平均最高,昌吉州东部次之,伊犁河谷地区平均最低,最高值和最低值分别位于伊犁河谷地区的察布查尔和昭苏(图 3a2)。各站点冬小麦生育期 ≥ 10 °C 积温呈极显著增加的趋势($P < 0.01$), ≥ 10 °C 积温倾向率变化范围为 48.6~87.7 °C · (10 a)⁻¹,塔额盆地和伊犁河谷地区各站增温速率差异不大,在 72.4~87.7 °C · (10 a)⁻¹ 区间波动,而昌吉州东部增温速率明显降低(图 3b2)。

冬小麦生育期降水量呈波动上升趋势,其倾向率为 9.82 mm · (10 a)⁻¹(图 2c)。近 60 年新疆旱地冬小麦平均降水量为 270.97 mm,2016 年降水量最多,达 403.21 mm,比降水最少的 1974 年多 111.96%。新疆旱地冬小麦生育期降水量

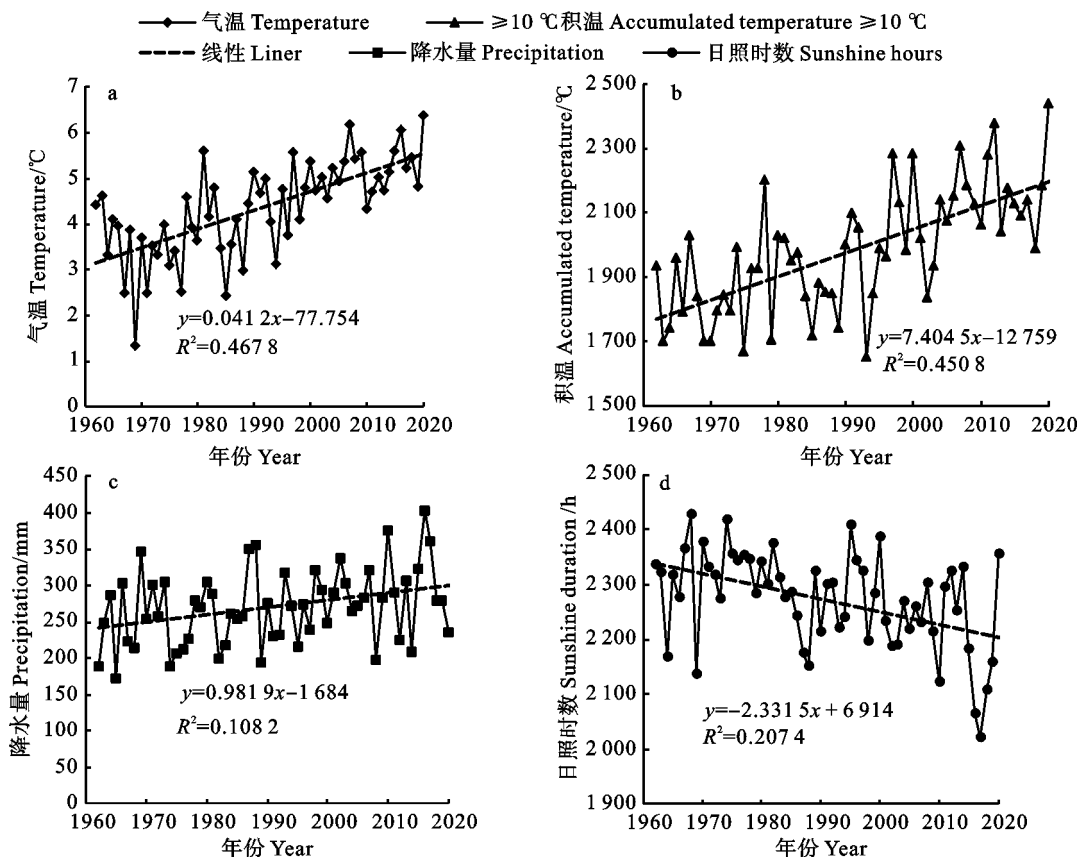


图 2 1961—2020 年新疆旱地冬小麦生育期平均气温(a)、 ≥ 10 °C 积温(b)、降水量(c)和日照时数(d)的年际变化特征
 Fig. 2 Characteristics of annual changes in mean air temperature(a), accumulated temperature(≥ 10 °C)(b), precipitation (c) and sunshine hours(d) during the reproductive period of winter wheat in drylands of Xinjiang from 1961 to 2020

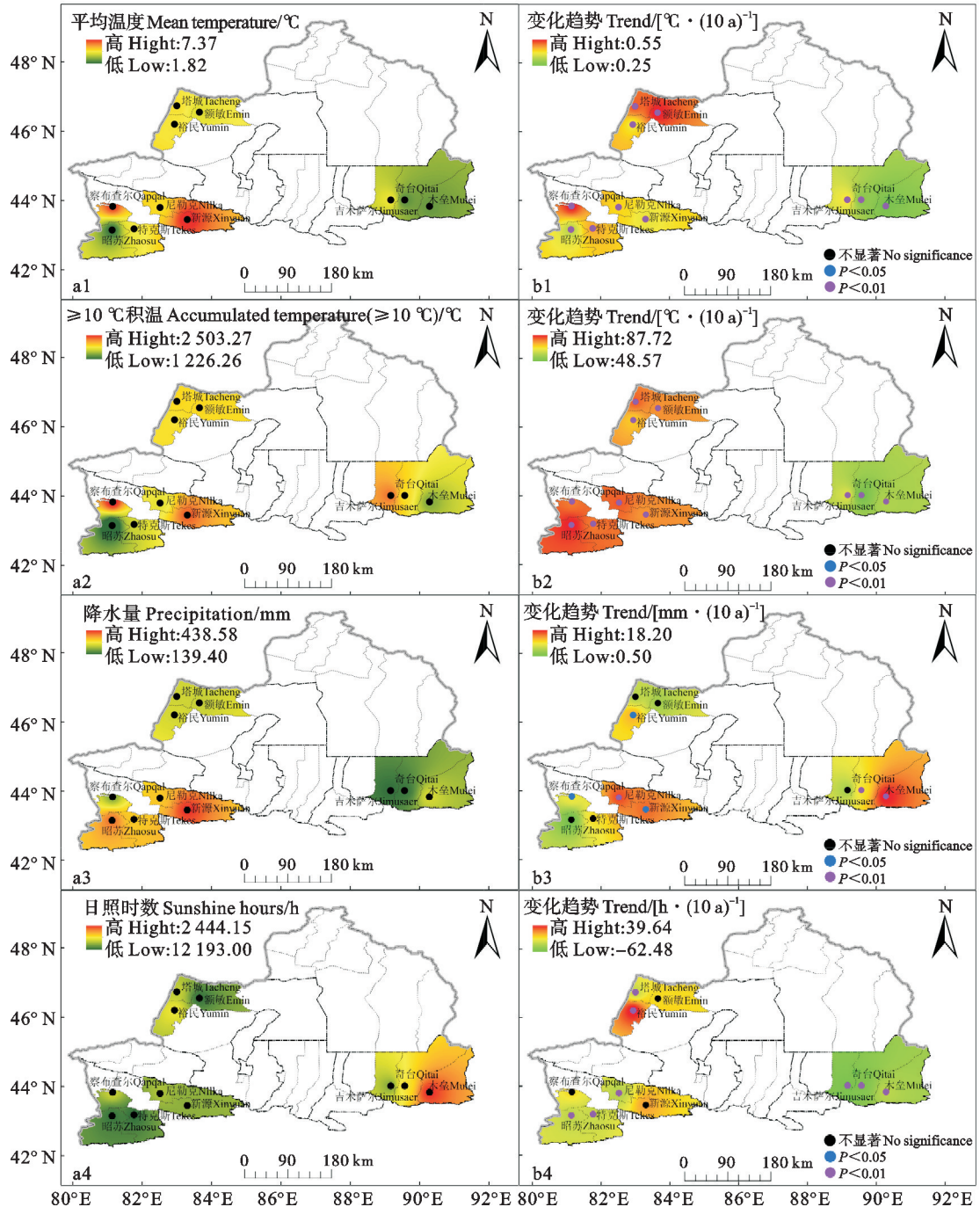


图 3 1961—2020 年新疆旱地冬小麦生育期平均温度、≥10 °C 积温、降水量、和日照时数(a)及其变化趋势(b)的空间分布
 Fig. 3 Spatial distribution of mean temperature, accumulated temperature(≥10 °C), precipitation, and sunshine hours(a) and their trends(b) during the reproductive period of winter wheat in dryland of Xinjiang from 1961 to 2020

空间分布差异明显,变化范围为 139.4~438.6 mm,整体呈伊犁河谷地区>塔额盆地>昌吉州东部,伊犁州新源和昭苏为生育期降水量的高值区,昌吉州东部的吉木萨尔和奇台为降水量的低值区(图 3a3)。从降水量倾向率空间分布(图 3b3)来看,昌吉州东部的平均降水倾向率最高,为 11.1 mm · (10 a)⁻¹,其次是伊犁河谷地区,塔额盆地

最低,为 7.84 mm · (10 a)⁻¹;其中尼勒克和新源、木垒均位于降水增速的高值区,平均速率达到 16.55 mm · (10 a)⁻¹,而昭苏降水增速最慢,仅以每 10 年 0.50 mm 的速率增加。通过对冬小麦生育期降水量 M-K 趋势检验,站点中木垒、奇台和尼勒克的降水量呈极显著上升趋势(P < 0.01),察布查尔、裕民和新源呈显著上升趋势(P < 0.05),

其他站点降水量上升趋势不显著($P > 0.05$)。

1961—2020 年新疆旱地冬小麦生育期日照时数均值为 2 271.96 h,并呈波动的递减趋势,变化倾向率为 $-23.32 \text{ h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,最高值出现在 1974 年,达 2 417.52 h,最低值出现在 2017 年,仅为 2 020.63 h(图 2d)。空间上整体以昌吉州东部的平均日照时数最高,其次为塔额盆地和伊犁河谷地区;其中昌吉州东部木垒日照时数最高,达 2 444 h,而低值区位于伊犁河谷地区昭苏、特克斯和塔额盆地的额敏,平均日照时数为 2 196 h(图 3a4)。伊犁河谷地区的新源和塔额盆地的裕民冬小麦生育期日照时数倾向率表现为增加的趋势,尤其裕民呈极显著增加趋势($P < 0.01$),其余站点倾向率均表现为减少的趋势,以昌吉州东部的奇台和吉木萨尔下降速率最快(图 3b4)。

2.2 气候变化对新疆旱地冬小麦生产潜力的影响

1961—2020 年新疆旱地冬小麦光温生产潜力随时间的推进呈波动上升趋势,平均增加速率为 $74.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;光温生产潜力近 60 年平均值为 $8 558.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最大、小值分别出现在 2012 年和 1988 年,分别为 $9 061.84$ 和 $8 011.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4a)。空间上冬小麦光温生产潜力的变化范围为 $6 953 \sim 9 404 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 5a1),整体表现为塔额盆地 $>$ 昌吉州东部 $>$ 伊犁河谷地区,最高值和最低值均分布在伊犁河谷地区,分别为察布查尔和昭苏。从冬小麦光温生产潜力倾向率空间分布(图 5b1)看,除昌吉州东部的吉木萨尔光温生产潜力倾向率为负值,并呈极显著减少趋势外($P < 0.01$),其余站点光温

生产潜力倾向率均呈增加趋势,以伊犁河谷地区的昭苏光温生产潜力上升速率最快,为 $181.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,而伊犁河谷地区的察布查尔和昌吉州东部的奇台光温生产潜力增速最慢,分别为 6.36 和 $7.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。M-K 显著性趋势检验结果表明,除察布查尔、奇台和木垒冬小麦光温生产潜力上升趋势不显著($P > 0.05$)外,其他站点均呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)上升趋势。

气候生产潜力与光温生产潜力的变化趋势大体一致(图 4b),随时间变化均呈波动上升趋势,气候倾向率为 $323.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,气候生产潜力近 60 年平均值为 $5 916.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,最小值和最大值分别在 1974 年($3 461.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 2016 年($8 205.69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。新疆旱地冬小麦气候生产潜力空间分布值变化范围为 $3 002 \sim 9 184 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,变化明显。受降水量的影响,冬小麦气候生产潜力整体上均呈现伊犁河谷地区最高,其次为塔额盆地和昌吉州东部;其中除察布查尔外,伊犁河谷地区其余站点均为气候生产潜力的高值区,平均达到 $8 193 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,昌吉州东部的吉木萨尔和奇台处于气候生产潜力低值区,平均达 $3 032 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从倾向率空间分布(图 5b2)看,整个新疆旱地小麦气候生产潜力倾向率均表现出增加的趋势,且不同地区生产潜力增速差异明显,整体呈现出昌吉州 $>$ 塔城地区 $>$ 伊犁州,其中昌吉州东部的木垒气候生产潜力增速最快,为 $648.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,伊犁河谷地区的新源县增速最慢,气候

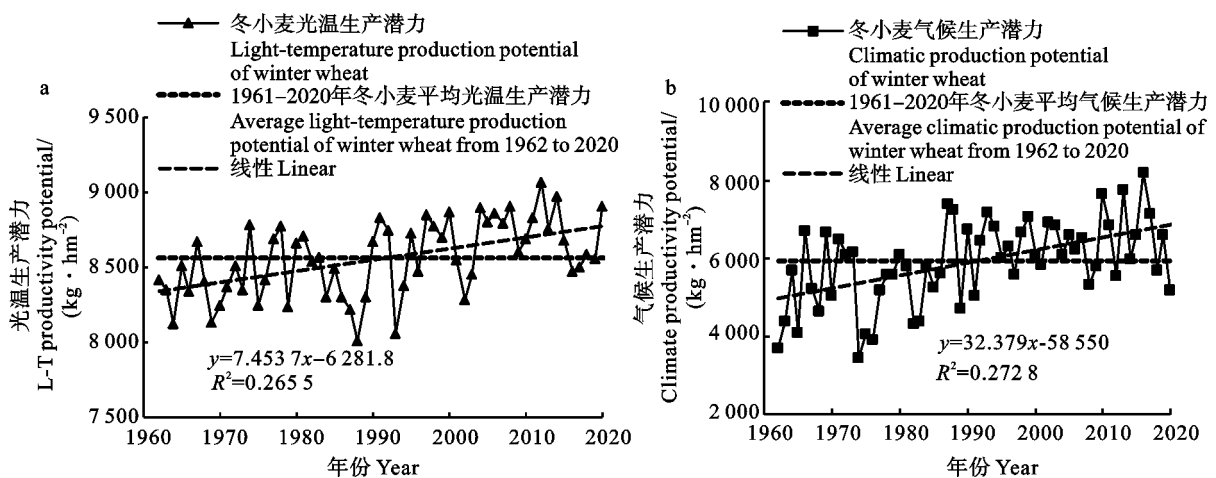


图 4 1961—2020 年新疆旱地冬小麦光温生产潜力(a)和气候生产潜力(b)的变化趋势

Fig. 4 Trends in light-temperature production potential (a) and climatic production potential (b) of winter wheat in dryland of Xinjiang from 1961 to 2020

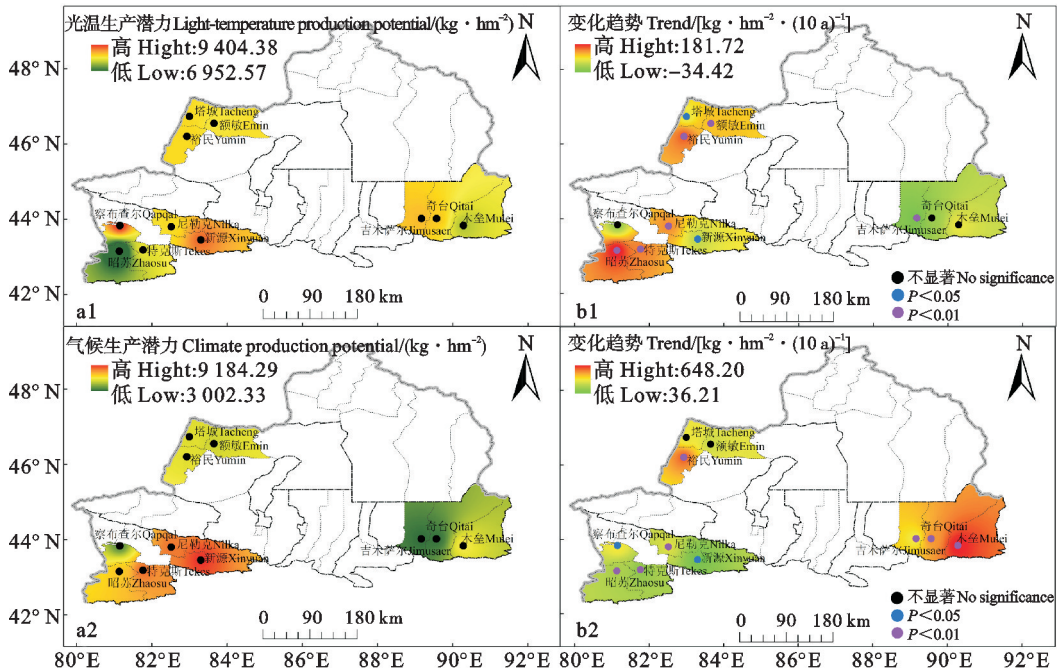


图 5 1961—2020 年新疆旱地冬小麦光温、气候生产潜力 (a) 及其变化趋势 (b) 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of light-temperature and climate production potential (a) and its trend (b) of winter wheat in dryland of Xinjiang from 1961 to 2020

倾向率为 $36.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。经 M-K 显著性趋势检验,除塔额盆地的塔城和额敏冬小麦气候生产潜力上升趋势不显著 ($P > 0.05$) 以外,其他站点均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 上升趋势。

2.3 新疆旱地冬小麦生产潜力与气象要素的相关性分析

2.3.1 新疆旱地冬小麦生产潜力与气象要素的相关性分析

相关性分析结果(表 3)显示,新疆旱地冬小

表 3 新疆旱地冬小麦光温生产潜力和气候生产潜力与气象要素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of light and temperature production potentials and climate production potentials of winter wheat with meteorological elements in drylands of Xinjiang

气象要素 Meteorological element	光温生产潜力 Light-temperature potential productivity	气候生产潜力 Climatic productivity potential
平均气温 Mean temperature	0.582**	0.156
$\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 Accumulated temperature ($\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$)	0.861**	0.137
降水量 Precipitation	-0.260*	0.851**
日照时数 Sunshine duration	0.253	-0.673**

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$.

麦光温生产潜力与日照时数呈正相关,与气温和 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温均呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与降水量呈显著负相关。旱地冬小麦气候生产潜力与气温、 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温均呈正相关,与降水量和日照时数分别呈极显著正相关和负相关。这说明新疆旱地冬小麦生育期内气温的升高及降水量的降低会显著提高冬小麦光温生产潜力,日照时数的降低和降水量的增加均会显著提高气候生产潜力。

2.3.2 新疆旱地冬小麦各研究站点生产潜力与气象要素的相关性分析

通过相关性分析,近 80% 的研究站点冬小麦光温生产潜力均与冬小麦生育期呈极显著正相关 ($P < 0.01$),且 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温与光温生产潜力的相关系数更高,影响更显著(表 4)。旱地冬小麦光温生产潜力与生育期降水量均呈负相关,与日照时数均呈正相关;其中木垒、额敏和新源旱地冬小麦光温生产潜力与生育期降水量呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 负相关,近 70% 左右的研究站点均与生育期日照时数呈显著或极显著正相关。近 70% 的站点气候生产潜力均与生育期降水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与日照时数呈负相关。伊犁河谷地区气候生产潜力与生育期平均温度和 $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温基本呈极显著正相关,其余站点与气温相关性不显著。木垒、奇台、塔城和尼

表 4 新疆旱地冬小麦研究站点光温生产潜力和气候生产潜力与气象要素相关性

Table 4 Correlation of light-temperature production potential and climatic production potential with meteorological factors at dryland winter wheat research sites in Xinjiang

生产潜力 Potential productivity	研究站点 Research Station	平均气温 Mean temperature	$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Accumulated temperature	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine duration
光温 Light-temperature	木垒 Mulei	0.613**	0.836**	-0.276*	0.279*
	奇台 Qitai	0.353**	0.643**	-0.235	0.257*
	吉木萨尔 Jimusaer	-0.161	0.111	-0.058	0.776**
	塔城 Tacheng	0.466**	0.660**	-0.235	0.322*
	裕民 Yumin	0.651**	0.839**	-0.132	0.748**
	额敏 Emin	0.575**	0.731**	-0.258*	0.474**
	察布查尔 Qapqal	-0.058	-0.048	-0.230	0.806**
	尼勒克 Nilka	0.613**	0.793**	-0.152	0.044
	特克斯 Tekes	0.698**	0.794**	-0.124	0.166
	新源 Xinyuan	0.342**	0.611**	-0.342**	0.743**
昭苏 Zhaosu	0.667**	0.729**	-0.109	0.191	
气候 Climatic	木垒 Mulei	0.101	0.091	0.791**	-0.352**
	奇台 Qitai	0.175	0.137	0.817**	-0.556**
	吉木萨尔 Jimusaer	0.217	0.081	0.695**	-0.253
	塔城 Tacheng	-0.201	-0.175	0.887**	-0.285*
	裕民 Yumin	0.016	-0.016	0.869**	-0.183
	额敏 Emin	-0.119	-0.136	0.890**	-0.359**
	察布查尔 Qapqal	0.050	-0.048	0.905**	-0.330
	尼勒克 Nilka	0.278*	0.421**	0.455**	-0.420**
	特克斯 Tekes	0.684**	0.782**	-0.032	0.102
	新源 Xinyuan	0.342**	0.611**	-0.342**	0.743**
昭苏 Zhaosu	0.667**	0.729**	-0.109	0.191	

** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$.

勒克气候生产潜力与日照时数呈显著或极显著负相关。由此表明,80%左右的研究站点气温和降水量分别成为限制光温生产潜力和气候生产潜力的主导因素。但生育期日照时数是限制吉木萨尔、察布查尔冬小麦光温生产潜力显著提高的气象因子;当降水量充足的条件下,限制特克斯和昭苏气候生产潜力的气候因子不再是降水量而是气温,限制新源的气候因子则是生育期日照时数。

2.3.3 回归分析结果

利用 1961—2020 年新疆旱地冬小麦光温和气候生产潜力与生育期内平均气温(T)、降水量(P)和日照时数(R)等气象要素建立线性回归模型,得到光温生产潜力和气候生产潜力回归方程分别为 $Y_{mp} = 151.440T - 0.206P + 0.890R + 5933.098 (R^2 = 0.92)$ 和 $Y_p = 122.452T + 17.923P + 0.274R - 94.891 (R^2 = 0.95)$ 。气温和日照时数对光温生产潜力具有正效应,但降水量则表现为负效应,且当降水量和日照时数保持不变时,温

度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,新疆旱地小麦光温生产潜力增加 $151.44\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,温度和降水量保持不变时,日照时数每增加 100 h ,小麦光温生产潜力增加 $89\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但当温度和日照时数保持不变时,降水量每增加 1 mm ,小麦光温生产潜力反而会减少 $0.206\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,减幅度较小。气温、降水量和日照时数对气候生产潜力均产生正效应,且当降水量和日照时数保持不变时,温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,新疆旱地小麦气候生产潜力增加 $122.452\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,温度和日照时数保持不变时,降水量每增加 1 mm ,小麦气候生产潜力增加 $17.923\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而当温度和降水量保持不变时,日照时数每增加 100 h ,小麦气候生产潜力上升 $27.4\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

根据新疆旱地小麦生育期气候要素变化趋势,得到小麦生育期内温度和降水量平均增加速率为 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 和 $9.82\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,日照时数减少速率平均为 $-23.32\text{ h} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,通过回归方程预测出未来新疆旱地冬小麦光温生

产潜力和气候生产潜力将分别以 39.31 和 $219.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 速度增加。由此可见,未来在新疆旱地农区暖湿化气候变化背景下,气候生产潜力增幅要显著高于光温生产潜力,而降水量的变化对旱地冬小麦气候生产潜力的影响起到至关重要的作用。

3 讨论

作物生产潜力是研究粮食综合生产能力的基础,主要受气温、降水量、太阳辐射、光照等气候条件的影响。本研究表明,1961—2020年新疆旱地冬小麦生育期平均气温、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和降水量均呈增加趋势,日照时数呈下降趋势,整体表现为暖湿化,与前人对新疆气候变化的研究结果基本一致^[27-28]。受气候暖湿化的影响,新疆旱地小麦光温生产潜力和气候生产潜力分别以 74.54 和 $323.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率均呈上升趋势,与众多学者^[29-31]得出气温升高、降水增多的暖湿型气候有利于作物生长和提高气候生产潜力的研究结果相同。热量资源和降水作为新疆旱地冬小麦生产潜力变化的主要驱动力,其中光温生产潜力主要受温度和 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温的影响,而降水量是影响气候生产潜力的主导因素^[32],各地区旱地冬小麦气温和降水量的增加对光温生产潜力和气候生产潜力均产生正效应;生育期气温和降水的增加可显著缩短越冬期,促进冬小麦生长和小花分化,有效降低冬小麦冻害和干旱对小麦生长产生的不利作用,提高小穗结实率,使不孕小穗率、越冬死亡率等显著降低^[33-34],增加冬小麦产量潜力。但新疆气候变化十分复杂,不仅存在不同时间尺度的演变过程,还存在明显的次区域差异特征,气候资源的变化对不同地区生产潜力的影响程度略有不同。在降水量丰富的伊犁河谷地区,热量资源尤其是 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温成为限制冬小麦光温和气候生产潜力的主导因素,温度的升高显著改善光合作用效率,促进光温生产潜力的增加^[35],这与王钧等^[36]、吕佳佳等^[37]的研究结论有相似之处。但生育期降水量少且温度较高的吉木萨尔和察布查尔县,限制光温生产潜力的主要因素为日照时数,这可能与生育期内较高的日照时长有利于叶片光合作用,积累光合产物^[38]有关。总体来看,气候暖湿化对新疆旱地冬小麦生产潜力的增加起到积极的作用。但本研究与张扬等^[29]研究结果相比,新疆旱地冬小麦生育期内气

温增速更快,降水量增速更慢。有研究指出,虽然气温上升对西北地区小麦产量增加具有促进作用^[39],但气温上升过高可能对雨养小麦减产的贡献度达到39%,尤其是高温热害和干旱等极端气候对于旱区和半干旱区小麦生长及产量的影响更为显著^[40-42],且王姣妍等^[43]同样发现了新疆气候呈现不同程度湿化趋势和更为严峻的干旱形势,这可能会对新疆旱地农业产生不利的影 响。因此,合理利用变化后的水热资源,趋利避害,以促进当地粮食稳产增产。例如,调整种植播期、采用蓄水保墒的栽培方式、选育优良抗旱品种等技术措施来适应可能出现的极端气候事件^[44],进一步挖掘新疆旱地冬小麦产量潜力。

本研究利用AEZ模型对新疆旱地冬小麦生产潜力进行估算,分析了新疆旱地冬小麦生育期气候因子及生产潜力的时空变化特征以及相互作用,但并未探讨目前新疆旱地冬小麦的增产潜力特征及其气候资源利用效率等方面的研究;同时由于研究时间年限较长,不同研究区域旱地冬小麦品种更新换代较快,未考虑品种对作物生产潜力所造成的差异,以及不同品种在不同区域生长发育过程中关键参数的本地化需要进一步完善,这对于制定新疆旱作农区不同区域的气候变化适应策略、保障旱地农业生产尤为重要,也是今后新疆旱地冬小麦进一步研究探讨的重点和方向。

4 结论

1961—2020年新疆旱地冬小麦生育期气温、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和降水量均随时间的推进均呈上升趋势,气候逐渐“暖湿化”,其光温生产潜力和气候生产潜力均呈逐渐增加趋势。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和降水量分别在塔额盆地和伊犁河谷地区达到最高,分别以塔额盆地和昌吉州东部增速最快,并表现出与光温生产潜力和气候生产潜力相一致的空间分布特征。而生育期日照时数整体以昌吉州东部最高且下降速率最快。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和降水量是影响新疆旱地冬小麦光温生产潜力和气候生产潜力的主要因素,日照时数对气候生产潜力呈显著负效应。综上,气候越暖、越湿越有利于旱地冬小麦生长。

参考文献:

- [1] 杨晓光,陈 阜. 气候变化对中国种植制度影响研究[M]. 北京:气象出版社,2014:1.
YANG XG, CHEN F. Climate change impacts on cropping

- system in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014:1.
- [2]孙颖.人类活动对气候系统的影响:解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章[J].大气科学学报,2021,44(5):654.
SUN Y. Impact of human activities on climate system: An interpretation of chapter III of WG I report of IPCC AR6 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 654.
- [3]高启慧,秦圆圆,梁媚聪,等. IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议[J].环境保护,2023,51(S2):82.
GAO Q H, QIN Y Y, LIANG M C, et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 synthesis report [J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(S2): 82.
- [4]IPCC AR5. Intergovernmental panel on climate change climate change fifth assessment report (AR5) [R]. London Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013:136.
- [5]SCHMIDHUBER J, TUBIELLO F N. Global food security under climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(50):19703.
- [6]HOWDEN S M, SOUSSANA J, TUBIELLO F N, et al. Adapting agriculture to climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104:19691.
- [7]TAO F, YOKOZAWA M, LIU J, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends [J]. *Climate Research*, 2008, 38(1):83.
- [8]SADE N, PELEG Z. Future challenges for global food security under climate change [J]. *Plant Science*, 2020, 295:110467.
- [9]LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980 [J]. *Science*, 2011, 333:616.
- [10]LOBELL D B, GOURDJI S M. The influence of climate change on global crop productivity [J]. *Plant Physiology*, 2012, 160(4):1686.
- [11]DELLAR M, TOPP C F E, BANOS G, et al. A meta-analysis on the effects of climate change on the yield and quality of European pastures [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265:413.
- [12]CONSTANTINIDOU K, HADJINICOLAOU P, ZITTIS G, et al. Effects of climate change on the yield of winter wheat in the eastern Mediterranean and Middle East [J]. *Climate Research*, 2016, 69(2):129.
- [13]MISHRA A, SINGH R, RAGHUWANSHI N S, et al. Spatial variability of climate change impacts on yield of rice and wheat in the Indian Ganga Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 468:S132.
- [14]BAI H, TAO F, XIAO D, et al. Attribution of yield change for rice-wheat rotation system in China to climate change, cultivars and agronomic management in the past three decades [J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3):539.
- [15]罗海平,邹楠,胡学英,等. 1980—2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J].资源科学,2021,43(6):1234.
LUO H P, ZOU N, HU X Y, et al. Climatic potential productivity and resources utilization efficiency of major grain crops in the main grain production areas of China, 1980—2019 [J]. *Resources Science*, 2021, 43(6):1234.
- [16]田展,梁卓然,史军,等.近50年气候变化对中国小麦生产潜力的影响分析[J].中国农学通报,2013,29(9):61.
TIAN Z, LIANG Z R, SHI J, et al. Analysis of impact on China wheat potential productivity of climate change during 1961—2010 [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(9):61.
- [17]钟新科,刘洛,徐新良,等.近30年中国玉米气候生产潜力时空变化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):94.
ZHONG X K, LIU L, XU X L, et al. Characteristics of spatial-temporal variation of maize climate productivity during last 30 years in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(15):94.
- [18]刘志娟,杨晓光,吕硕,等.气候变化背景下东北三省春玉米产量潜力的时空特征[J].应用生态学报,2018,29(1):103.
LIU Z J, YANG X G, LÜ S, et al. Spatial-temporal variations of spring maize potential yields in a changing climate in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1):103.
- [19]李军,谢国辉.新疆主要棉区光合有效辐射、光温生产潜力的估算、分析[J].新疆气象,2000(6):21.
LI J, XIE G H. Analysis and evaluation of PAR(photosynthetically active radiation) and light-temperature productivity potential [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology*, 2000(6):21.
- [20]柳延涛,杜红,李鲁华,等.新疆玉米生产农业气候资源及生产潜力估算[J].新疆农业科学,2012,49(10):1908.
LIU Y T, DU H, LI L H, et al. Agricultural climatic resources of Xinjiang maize production and its production potential estimation [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2012, 49(10):1908.
- [21]李中光,钟骏平.新疆旱地农业现状及发展建议[J].新疆农业科学,1991,28(3):99.
LI Z G, ZHONG J P. Current situation and development proposals for dryland agriculture in Xinjiang [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1991, 28(3):99.
- [22]魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
WEI F Y. Statistics technology of diagnose and forecast of modern climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [23]ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO, 1998:37-58.
- [24]何旭刚,买买提·沙吾提,夏梓洋,等.1960—2020年新疆主要作物需水量时空特征分析[J].作物学报,2023,49(12):3352.
HE X G, MAMAT S, XIA Z Y, et al. Spatio-temporal characteristics of water requirement of main crops in Xinjiang from 1960 to 2020 [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(12):3352.
- [25]赵俊芳,郭建平,邹定荣,等.2011—2050年黄淮海冬小麦、夏玉米气候生产潜力评价[J].应用生态学报,2011,22(12):3189.
ZHAO J F, GUO J P, WU D R, et al. Climatic potential productivity of winter wheat and summer maize in Huang-Huai-Hai Plain in 2011—2050 [J]. *Chinese Journal of Applied*

- Ecology*, 2011, 22(12): 3189.
- [26] 薛华柱, 李阳阳, 董国涛. 基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923.
XUE H Z, LI Y Y, DONG G T. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi Corridor based on SPEI index [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(11): 923.
- [27] 吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961—2017 年新疆区域气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 27.
WU X L, ZHANG T X, WANG H, *et al.* Characteristics of temperature and precipitation change in Xinjiang during 1961—2017 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020, 14(4): 27.
- [28] 张 扬, 楚新正, 杨少敏, 等. 近 56a 新疆北部地区气候变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 212.
ZHANG Y, CHU X Z, YANG S M, *et al.* Climate change in North Xinjiang in recent 56 years [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(1): 212.
- [29] 张艺萌, 张雪松, 郭婷婷, 等. 辽西北地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 203.
ZHANG Y M, ZHANG X S, GUO T T, *et al.* Characteristics of temperature and precipitation change and the influence on climate productive potential in the northwestern Liaoning [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(2): 203.
- [30] 刘 新, 刘林春, 尤 莉, 等. 内蒙古地区气候生产潜力变化及其敏感性分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(8): 531.
LIU X, LIU L C, YOU L, *et al.* Characteristics and sensitivity analysis of climate production potential in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(8): 531.
- [31] 安 彬, 肖薇薇, 张淑兰, 等. 近 58 年江西省气候及其生产潜力时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 122.
AN B, XIAO W W, ZHANG S L, *et al.* Spatial and temporal features of climate and its potential productivity in Jiangxi Province during the period 1960—2017 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4): 122.
- [32] 齐 月, 张 强, 胡淑娟, 等. 黄土高原地区气候变化及其对冬小麦生产潜力的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1521.
QI Y, ZHANG Q, HU S J, *et al.* Climate change and its impact on winter wheat potential productivity of Loess Plateau in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8): 1521.
- [33] 郭海英, 张谋草, 周忠文, 等. 气候暖湿化及其对陇东冬小麦生产的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(15): 127.
GUO H Y, ZHANG M C, ZHOU Z W, *et al.* The impact of warming and wetting of climate on production of winter wheat in Eastern Gansu Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(15): 127.
- [34] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5154.
YAO Y B, WANG R Y, YANG J H, *et al.* Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5154.
- [35] 张泽民, 吕昌河. 青藏高原不同积温条件下春小麦光温生产潜力及其对气候变化的响应[J]. 中国农业科学, 2022, 55(11): 2135.
ZHANG Z M, LÜ C H. Photo-temperature potential yield of spring wheat at different accumulated temperature ranges and its response to climate change in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(11): 2135.
- [36] 王 钧, 李 广, 闫丽娟, 等. 气候变化背景下甘肃农牧交错带玉米气候生产潜力和资源利用效率变化特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 160.
WANG J, LI G, YAN L J, *et al.* Variation characteristics of climatic potential yield and resources utilization efficiency of maize under the background of climate change in agro-pastoral transitional zone of Gansu, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(1): 160.
- [37] 吕佳佳, 刘 松, 李宇光, 等. 黑土区马铃薯气候生产潜力对气候变化的响应及优势产区增产空间研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(11): 88.
LÜ J J, LIU S, LI Y G, *et al.* Response of potato climatic potential productivity to climate change in black soil region and yield increase potential in dominant production areas [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(11): 88.
- [38] 任海红, 郭丰辉, 刘小荣, 等. 不同年份气象因子对夏大豆生长及产量的影响[J]. 中国种业, 2023(8): 61.
REN H H, GUO F H, LIU X R, *et al.* Effect of meteorological factors in different years on the growth and yield of summer soybean [J]. *China Seed Industry*, 2023(8): 61.
- [39] XIAO G, ZHANG Q, YAO Y, *et al.* Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid Northwestern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(1-2): 37.
- [40] 戴 彤, 王 靖, 赫 迪, 等. 1961—2010 年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 293.
DAI T, WANG J, HE D, *et al.* Impact simulation of climate change on potential and rainfed yields of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010 [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(3): 293.
- [41] CHEN Y, ZHANG Z, WANG P, *et al.* Identifying the impact of multi-hazards on crop yield—a case for heat stress and dry stress on winter wheat yield in Northern China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 73: 55.
- [42] TAO F, ZHANG Z, ZHANG S, *et al.* Variability in crop yields associated with climate anomalies in China over the past three decades [J]. *Regional Environmental Change*, 2016, 16(6): 1715.
- [43] 王姣妍. 新疆气候暖湿化背景下干旱分布与演变特征[J]. 干旱环境监测, 2023, 37(1): 15.
WANG J Y. The distribution and evolution of Xinjiang's Arid Zone under climate warming and humidification [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2023, 37(1): 15.
- [44] 张秀云, 姚玉璧, 杨金虎, 等. 中国西北气候变暖及其对农业的影响对策[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1514.
ZHANG X Y, YAO Y B, YANG J H, *et al.* Characteristic and countermeasures of climate warming and its impacts on agriculture in Northwest China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(9): 1514.